

Г. В. Кулак¹, К. Б. Дубровская¹, Т. В. Николаенко¹, П. И. Ропот²

¹УО «Мозырский государственный педагогический университет
имени И. П. Шамякина», Мозырь Беларусь

²Институт физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси,
Минск, Беларусь

ВОЗБУЖДЕНИЕ ГИПЕРЗВУКА СИСТЕМОЙ ВСТРЕЧНО- ШТЫРЕВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Введение

Расчет ультразвуковых (УЗ) полей, возбуждаемых с поверхности пьезокристалла, проводят, как правило, на основе теории антенных решеток, в рамках которой не удается с достаточной точностью описать возбуждаемое УЗ поле [1]. Для разработки акустооптических (АО) модуляторов, ультразвуковых линий задержки, акустических фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) используются кристаллы ниобата лития ($LiNbO_3$) [2, 3]. Возможность эффективного возбуждения объемных акустических волн системой встречно-

штыревых преобразователей (ВШП) продемонстрирована в работе [4]. Произведённые в [5] в рамках приближённой теории антенных решеток теоретические исследования показали возможности возбуждения и детектирования сдвиговых УЗ волн. В настоящей работе исследовано нерезонансное возбуждение продольных и сдвиговых объемных УЗ волн высокой частоты системой ВШП в широком диапазоне акустического спектра в тригональных кристаллах $LiNbO_3$.

Результаты теоретических исследований

В многоэлементной системе ВШП, период которой d , ширина металлической полоски равна a , ширина не металлизированного участка – b (рисунок 1). Эффективная длина перекрытия электродов ВШП $w \gg d$. При подаче на электроды противофазного высокочастотного напряжения возбуждаются объемные УЗ волны высокой частоты, распространяющиеся под малыми углами к оси OZ .

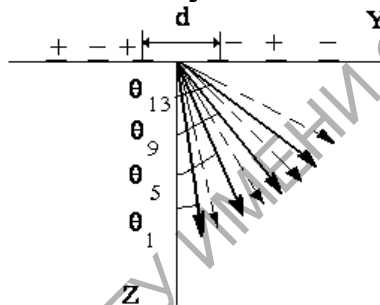


Рисунок 1 – Схема возбуждения сдвиговых и продольных объемных УЗ волн системой ВШП (направления распространения сдвиговых УЗ волн показаны сплошными линиями, продольных УЗ волн – пунктирными линиями; «левосторонние» лепестки, расположенные симметрично относительно оси OZ , не показаны)

При увеличении частоты СВЧ поля на электродах ВШП последовательно возбуждаются псевдоповерхностные ПАВ Рэлея разных порядков m , энергия которых трансформируется в энергию объемных УЗ волн [6]. Резонансные частоты ПАВ находим в соответствии с соотношением $f_{2m'+1} = \nu_R(2m'+1)/2d$, где $m' = 0, 1, 2, 3, \dots$; ν_R – фазовая скорость рэлеевской УЗ волны, распространяющейся вдоль оси OY . Первая резонансная частота $f_1 = \nu_R / \Lambda$, где $\Lambda = 2d$. Каждой гармонике ПАВ, частота которой $f_{2m'+1}$, соответствует квазиобъемная УЗ волна, распространяющаяся в направлении, определяемом углом [6]:

$$\theta_{2m'+1}^{2m'+1} = \arcsin[\nu_s(2m+1)/2df_1(2m'+1)], \quad (1)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$

Из (1) следует, что для получения квазиобъемных УЗ волн, распространяющихся под малыми углами к оси OZ , следует использовать гармоники ПАВ высоких порядков. Под наименьшим углом распространяются волны, соответствующие $m = 0$.

Численные расчеты производились для YZ -среза кристалла $LiNbO_3$ при следующих значениях параметров: фазовые скорости продольных и сдвиговых УЗ волн, распространяющихся вдоль оси OZ , соответственно $v_l = 7200$ м/с и $v_s = 3570$ м/с [6]; период электродной системы $d = 10,6$ мкм; число пар штырей ВШП $N = 19$. Кроме того, полагалось, что $a = b = d/2$.

Для получения широкополосного АО взаимодействия необходимо возбудить гармоники ПАВ высоких порядков, то есть пятую, девятую и тринадцатую. При этом резонансные частоты соответственно равны $f_5 = 0,9$ ГГц, $f_9 = 1,6$ ГГц, $f_{13} = 2,3$ ГГц. Указанным частотам соответствуют следующие углы резонансного возбуждения сдвиговых УЗ волн: $\theta_5^{ls} = 10,6^\circ$, $\theta_9^{ls} = 6,2^\circ$, $\theta_{13}^{ls} = 4,13^\circ$. Так как $\tilde{v}_s \ll \tilde{v}_l$, то углы, соответствующие резонансному возбуждению продольных УЗ волн, больше углов, при которых возбуждаются сдвиговые УЗ волны, и равны соответственно $\theta_5^{ll} = 20,3^\circ$, $\theta_9^{ll} = 12^\circ$, $\theta_{13}^{ll} = 8,4^\circ$. Резонансные углы определены в результате численных расчётов амплитуд смещения для продольных и сдвиговых УЗ волн на основе выражений (7), (8). Они близки по значению углам, вычисленным с использованием выражений (1). Однако возбуждение объемных УЗ волн системой ВШП не следует считать резонансным эффектом [6]. При этом нельзя рассчитать период ВШП, задавая центральную частоту УЗ излучения. Из выражений (7), (8) следует, что, варьируя период ВШП преобразователя, можно возбудить объемные звуковые волны любой частоты, большей нескольких резонансных частот возбуждения ПАВ ($f > f_{2m'+1}$).

Из численных расчетов, представленных на рисунке 2 следует, что наряду с узкими резонансными максимумами, которые формируются при интерференционном наложении волн боковых лепестков возбуждения с поверхности, в кристалле существуют области нерезонансного возбуждения гиперзвука, заключенные в широком угловом (θ) и частотном (f) диапазоне. При этом амплитуда смещения в областях нерезонансного возбуждения гиперзвука только на порядок меньше, чем в максимуме, соответствующем резонансной области. Например, при интенсивности УЗ волны ~ 10 Вт/см² максимальная амплитуда

сдвиговой составляющей в резонансной области $u_s = 1,2 \cdot 10^{-7}$ м, а в нерезонансной области $\sim 10^{-8}$ м.

Амплитуды смещений u_l продольных составляющих УЗ волн (рисунок 2, б) в резонансной и нерезонансной области отличаются более значительно, чем амплитуды сдвиговых волн. Кроме того, сдвиговым составляющим u_s (рисунок 2, а) соответствуют более широкие области углового и частотного спектра возбуждения гиперзвука. Например, в интервале углов $\Delta\theta^s = 4,8^\circ \div 5,6^\circ$ диапазон перестройки частоты составляет F_{ij} ; угловому диапазону $\Delta\theta^s = 6,8^\circ \div 7,6^\circ$ соответствует диапазон частотной перестройки $\Delta f = (1,1 \div 1,4)$ ГГц.

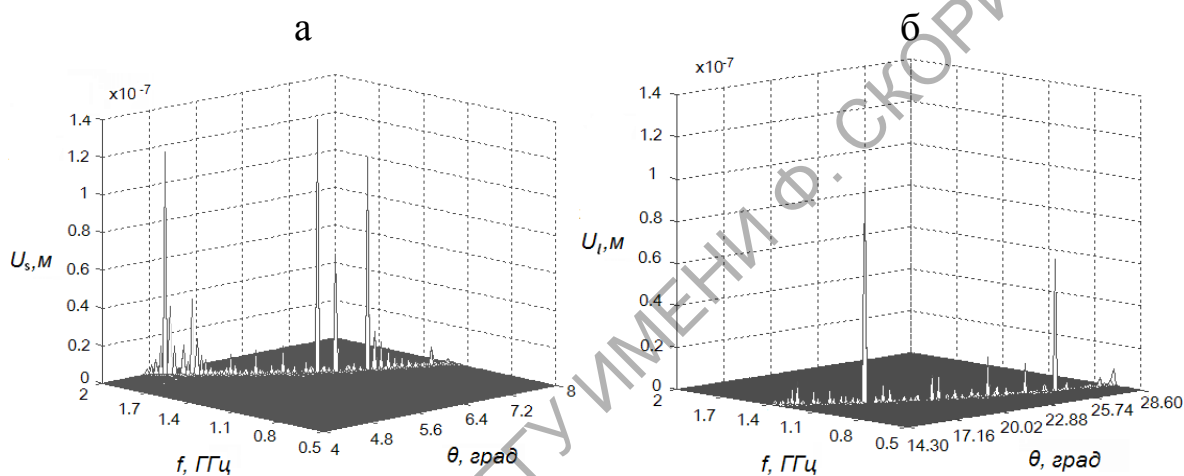


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды смещения УЗ волн от полярного угла θ и частоты ультразвука f ($u_0 = 1$ В, $d = 10,6$ мкм, $a = b$, $R_1 = 0,01$ м, $L = 201,4$ мкм; а – сдвиговые УЗ волны, u_s ; б – продольные УЗ волны, u_l)

Следует отметить, что частотный диапазон нерезонансного возбуждения продольных УЗ волн сдвинут в сторону меньших частот по сравнению с частотным диапазоном нерезонансного возбуждения сдвиговых волн; при этом значительно отличаются резонансные углы возбуждения θ .

Заключение

Рассмотренные особенности нерезонансного возбуждения гиперзвука в широком частотном диапазоне могут быть использованы при создании широкополосных акустооптических модуляторов, дефлекторов, спектроанализаторов и ультразвуковых линий задержки, предназначенных для работы в СВЧ диапазоне.

Литература

1. Раздобудько, В. В. Исследование АЧХ акустооптического СВЧ дефлектора с возбуждением звука системой встречно-штыревых преобразователей / В. В. Раздобудько // Известия вузов. Радиоэлектроника – 1991. – Т. 34, № 9. – С. 42–46.

2. Зеленка, И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах / И. Зеленка. – М.: Мир, 1990. – 583 с.

3. Высоцкий, Б. Ф. Интегральные пьезоэлектрические устройства фильтрации и обработки сигналов: справочное пособие / Б.Ф. Высоцкий, В. В. Дмитриев; под ред. Б. Ф. Высоцкого, В. В. Дмитриева. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.

4. Винник, Д. М. Технология и конструирование в электронной аппаратуре / Д. М. Винник, Г. И. Вороняк // Техника и технология СВЧ. – 2007. – № 2. – С. 17–20.

5. Robert, F. M. Analysis of generation and detection of surface and bulk acoustic waves by interdigital transducers / F. M. Robert, N. H. C. Reilly, M. Redwood // IEEE Trans. on Sonics and Ultrason. – 1977. – Vol. SU-24, № 3. – P. 147–166.

6. Дъельсан, Э. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов / Э. Дъельсан, Д. Руайе. – М.: Наука, 1982. – 424 с.

7. Балакирев, М. К. Волны в пьезокристаллах / М. К. Балакирев, И. А. Гилинский. – Новосибирск: Наука, 1982. – 237 с.